

논문 2011-48SP-6-4

스마트폰에서의 능동적 3차원 형상 취득 기법

(Active 3D Shape Acquisition on a Smartphone)

원 재 현*, 유 진 우*, 박 인 규**

(Jae Hyun Won, Jin Woo Yoo, and In Kyu Park)

요 약

본 논문에서는 스마트폰 단말기에 장착되어있는 카메라와 플래시를 이용한 photometric stereo 기반의 능동적 3차원 형상 취득 기법을 제안한다. 조명의 위치 변화에 따라 여러 장의 입력 영상을 취득하기 위해 고정된 위치에서 영상을 취득하는 스마트폰 한 대와 위치를 변화시키며 조명을 투사하는 스마트폰 한 대를 이용하여 시스템을 구성한다. 우선 카메라 렌즈의 왜곡과 카메라 센서의 비선형성 반응함수에 의한 3차원 형상 취득의 오차를 줄이기 위해 카메라 보정을 수행한다. 또한 스마트폰 카메라간의 자세를 추정하기 위해 5-point 알고리즘을 적용한 후 이를 이용하여 광원의 방향 벡터를 추정한다. 그 후 취득된 영상과 추정된 광원의 방향 벡터를 이용하여 photometric stereo 기법으로 3차원 형상을 취득한다. 실험결과 본 논문에서 제안하는 기법을 통하여 스마트폰이 저비용 고품질의 소형화된 3차원 카메라의 역할을 수행할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

Abstract

In this paper, we propose an active 3D shape acquisition method based on photometric stereo using camera and flash on a smartphone. Two smartphones are used as the master and slave, in which the slave projects illumination from different locations while the master captures the images and processes photometric stereo algorithm to reconstruct 3D shape. In order to reduce the error, the smartphone's camera is calibrated to overcome the effect of the lens distortion and nonlinear camera sensor response. We apply 5-point algorithm to estimate the pose between smartphone cameras and then estimate lighting direction vector to run the photometric stereo algorithm. Experimental result shows that the proposed system enables us to use smartphone as a 3D camera with low cost and high quality.

Keywords : Active 3D shape acquisition, photometric stereo, smartphone

I. 서 론

최근 잇따른 3차원 영화의 개봉에 힘입어 3차원 영상과 실감 미디어에 대한 대중의 관심이 크게 증가하였고 나아가 가정용 3차원 TV의 보급에도 크게 기여하고 있다. 뿐만 아니라 컴퓨터 성능의 발전과 3차원 형상 복원 기술의 진보로 전문가가 아닌 일반 사용자들도 손쉽게

3차원 영상 및 실감 미디어로의 접근이 가능하게 되었다. 그러나 이러한 접근 용이성에 비하여 3차원 콘텐츠 저작은 여전히 많은 비용과 시간이 필요하고, 특히 일반 사용자들이 손쉽게 3차원 콘텐츠를 저작하는 것은 아직 쉽지 않은 상황이다.

한편 고해상도의 카메라와 고성능의 프로세서를 장착한 스마트폰의 개발은 꾸준히 이루어져 왔고 이에 따라 현재의 스마트폰에서는 고해상도의 동영상 재생뿐만 아니라 고품질의 3차원 모델을 실시간으로 렌더링 하는 것이 가능해졌다. 이러한 고성능의 스마트폰을 사용하는 사용자의 수는 급격히 증가하고 있으며 결과적으로 스마트폰에서 다양한 어플리케이션의 수요가 급격히 증가하고 있다. 따라서 2차원 영상, 동영상 등에서 3차원

* 학생회원, ** 평생회원, 인하대학교 정보통신공학부 (School of Information and Communication Engineering, Inha University)

※ 본 연구는 (주)삼성전자의 지원으로 수행되었음. 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2011-(C1090-1111-0003)).

접수일자: 2011년9월8일, 수정완료일: 2011년10월5일.

실감 콘텐츠로의 자연스러운 수요변화가 예상된다.

한편 컴퓨터 비전 기술을 이용한 3차원 카메라의 개발은 오랫동안 연구가 진행되어 왔으며 디지털 카메라에서 두 개의 광학계를 장착하여 좌, 우 영상을 취득함으로써 입체 영상을 취득하는 방법은 이미 상용화되었다. 그러나 이러한 입체 영상 기법은 물체의 3차원 형상을 직접 복원하지 않기 때문에 다양한 3차원 실감 미디어 어플리케이션에서의 활용도가 제한될 수밖에 없다.

스마트폰 등의 모바일 단말기를 이용하여 3차원 형상을 복원하는 연구는 거의 수행되지 않았거나 매우 초기 단계에 머물러 있다. Lee 등은 스마트폰에서 여러 각도에서 취득된 영상을 이용하여 물체의 윤곽선 정보로부터 shape from silhouette 방법을 적용하여 3차원 형상을 취득하는 연구를 수행하였다^[1]. 그러나 이 기법은 정확한 전경과 배경 분리 과정이 필요하고 오목한(convex) 영역에 대한 복원이 어렵다. Higo 등은 조명이 장착된 카메라를 이용하여 조명의 위치를 변화시키는 photometric stereo 기법과 다시점의 영상으로부터 여러 개의 변이 지도(disparity map)를 획득하고 이로부터 3차원으로 형상을 복원하는 multi-view stereo 기법을 결합하여 소형화된 3차원 카메라 시스템을 제안하였다^[2]. 그러나 수십 장의 영상 취득이 필요하며 많은 연산량을 필요로 하기 때문에 스마트폰에서 직접 구현하기 어려운 단점이 있다.

본 논문에서는 스마트폰 카메라를 이용하여 3차원 형상을 취득하기 위하여, 기존의 수동적인(passive) 기법과 달리 스마트폰 단말기가 장착하고 있는 플래시를

이용하는 능동적인(active) 취득 기법을 제안한다. 제안하는 시스템은 두 대의 스마트폰을 이용하여 서로 다른 위치에서의 조명에 대한 영상을 취득하고 photometric stereo 기법을 적용하여 복원하고자 하는 물체의 법선 지도(normal map)를 복원한다. 복원된 법선 지도로부터 Poisson 방정식의 풀이 과정을 거쳐 깊이 영상을 취득한다. 본 논문에서 제안하는 스마트폰 기반 3차원 형상 취득 시스템의 블록 구성도는 그림 1에 도시 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 photometric stereo 기법을 소개하고 제 III장에서 영상 전처리 과정으로서의 카메라 보정 및 전경과 배경의 영역 분리에 대하여 설명한다. 제 IV장과 제 V장에서는 SURF, RANSAC, 그리고 5-point 알고리즘을 이용한 카메라간의 자세 추정과 깊이 영상 생성 방법에 대해 각각 기술한다. 제 VI장에서 실험 결과를 제시하고 제 VII장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. Photometric Stereo 기법

1. Photometric Stereo 기법 개요

Photometric stereo 기법은 조명 광원의 위치 변화에 따른 물체의 반사 특성을 이용하여 3차원 형상을 취득하는 기법이다. 밝기가 일정한 광원이 Lambertian 반사 특성을 가지는 물체에 조명을 투사할 때 영상에서 관찰되는 특정 화소 위치에서의 밝기 값 I 는 식 (1)과 같이 표면의 반사도 ρ 와 표면의 법선 벡터 \mathbf{n} , 그리고 광원의 방향 벡터 \mathbf{s} 의 내적으로 표현된다.

$$I = \rho \mathbf{s} \cdot \mathbf{n} \tag{1}$$

그러나 위와 같은 식을 만족하는 해는 무수히 많기 때문에 조명 변화에 따른 여러 장의 영상을 취득하여 위 식의 해를 구한다^[3~4]. 서로 다른 위치에서 조명을 투사할 경우 고정된 카메라 위치에서 각각 취득된 N 장 영상의 밝기 값은 식 (2)와 같이 식 (1)을 확장하여 표현 할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_N \end{pmatrix} = \rho \begin{pmatrix} \mathbf{s}_1^T \\ \vdots \\ \mathbf{s}_N^T \end{pmatrix} \mathbf{n} \tag{2}$$

식 (2)로부터 최소자승해(least square solution)를 이용하여 해를 구하면 표면의 반사도와 표면의 법선 벡터

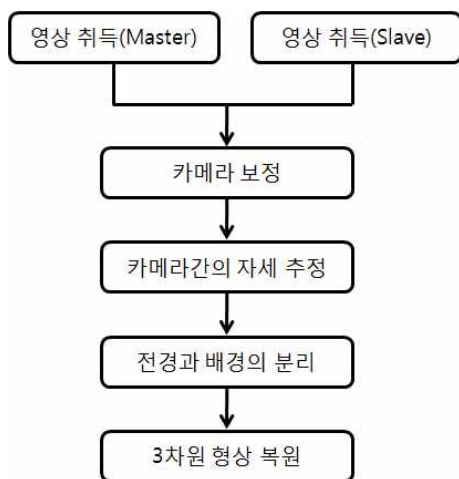


그림 1. 제안하는 시스템의 블록 구성도
Fig. 1. Block diagram of the proposed system.

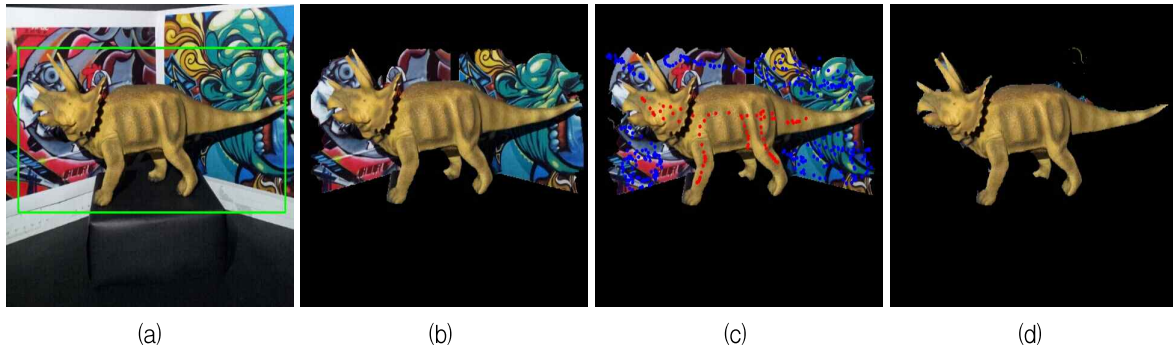


그림 2. 전경과 배경의 분리 과정 (a) 초기의 직사각형 영역 지정의 사용자 입력 (b) 초기의 영역 분리 결과 (c) 사용자 스트로크 입력 (d) 영역 분리 결과

Fig. 2. Segmentation of foreground and background (a) Initial user input by specifying a rectangular region (b) Initial segmentation result (c) Further user input by drawing strokes on the foreground (d) Final result.

를 구할 수 있다.

2. 스마트폰을 이용한 Photometric Stereo 기법

본 논문에서는 스마트폰의 카메라와 플래시를 각각 영상 취득과 조명 장치로 사용하는 photometric stereo 기법을 제안한다. 카메라와 플래시는 고정되어 있기 때문에 제안하는 기법에서는 두 대의 스마트폰을 이용하여, 첫 번째 스마트폰은 위치를 바꿔가며 플래시의 조명을 투사하고 두 번째 스마트폰은 고정된 위치에서 첫 번째 스마트폰의 플래시 조명에 의해 음영이 변화된 영상을 취득한다. 즉, 첫 번째 스마트폰은 보조(slave) 역할을 하여 플래시 조명을 투사하는 역할을 하고, 두 번째 스마트폰은 물체의 영상을 취득하고 주요 연산을 수행하는 주(master) 역할을 한다.

Photometric stereo 기법을 적용하기 위하여 카메라와 조명 위치의 상대적 변환 관계의 추정이 필요하다. 이를 위하여 보조 스마트폰에서도 물체의 영상을 취득하고 주 스마트폰의 영상과의 특징점 정합을 통해 두 스마트폰 간의 변환 관계를 구한다. 스마트폰의 카메라와 플래시간의 거리는 물체까지의 거리에 비하여 무시할 정도로 작기 때문에 두 번째 스마트폰의 카메라와 플래시의 위치가 같다고 가정할 수 있다.

III. 영상 전처리

1. 카메라 보정

조명을 이용하는 능동적 형상 취득은 카메라 왜곡, 물체의 반사 특성, 조명의 속성 등에 영향을 받는다. 따라서 본 논문에서는 기하학적(geometric) 보정 및 방

사도(irradiance) 보정을 수행하여 3차원 형상 취득의 정확성을 향상 시킨다.

(1) 기하학적 보정

스마트폰 카메라는 초점거리가 짧은 소형 렌즈를 사용하기 때문에 렌즈의 제조 과정상 접선 왜곡과(tangential distortion) 구면 렌즈로 인한 방사 왜곡(radial distortion)이 존재할 가능성이 크다. 이를 보정하기 위해 본 논문에서는 Matlab의 카메라 보정 툴박스^[5]를 오프라인으로 처리하여 영상을 보정한다.

(2) 방사도 보정

카메라에서 취득되는 화소의 밝기 값은 카메라의 반응함수에 의해 실제 입사되는 빛의 양과 선형적으로 비례하지 않기 때문에 능동적 형상 취득에 오차를 발생시킨다. 일반적인 카메라의 반응 함수는 단조 증가이기 때문에 반응 함수의 역함수를 구하여 방사도 값을 추정하고 선형적으로 보정한다.^[6] 여기서 반응 함수는 노출 시간을 다르게 하여 여러 영상을 취득한 후 Robertson^[7]의 알고리즘을 이용하여 얻을 수 있다.

2. 전경과 배경 분리

카메라에서 취득되는 영상은 복원하고자 하는 물체 뿐만 아니라 배경을 함께 포함하고 있다. 취득된 영상의 모든 영역에 대하여 연산을 수행할 경우 연산 과다 및 메모리 부족의 문제가 발생한다. 따라서 전경과 배경을 분리하고 전경 영역에 대해서만 복원을 수행하는 것이 효율적이다. 본 논문에서는 사용자 입력을 활용한 전역적 최적화 기반의 GrabCut^[11] 기법을 이용하여 전경

과 배경의 분리를 수행한다. 그림 2 (a)와 같이 사용자로부터 사각형 영역을 입력받아 초기의 전경과 배경 영역을 분리 하고 그림 2 (c)와 같이 오차가 발생하는 부분에 대하여 사용자 스트로크 입력을 통하여 정교한 전경과 배경의 분리를 수행한다.

IV. 두 대의 스마트폰의 상대적 자세 추정

Photometric stereo 기법을 적용하기 위해서는 광원의 방향벡터 추정이 필요하다. 보조 스마트폰의 조명의 방향벡터는 두 스마트폰에서 취득된 영상을 이용한 상대적 자세 추정을 통해 구할 수 있다. 이를 위해 본 논문에서는 각각의 스마트폰에서 취득된 영상을 SURF (speeded-up robust features)^[8]를 이용하여 특징점 추출 및 정합을 수행하고 정합된 점으로부터 RANSAC (random sample consensus)^[9]과 5-point^[10] 알고리즘을 이용하여 스마트폰 카메라간의 자세를 추정한다.

우선 보조 스마트폰에서 영상을 취득하고 SURF를 이용하여 64차원 벡터 정보를 가지는 SURF 기술자(descriptor)를 구한 뒤 Bluetooth 통신을 통해 주 스마트폰으로 전송한다. 주 스마트폰에서도 마찬가지로 플래시 조명에 의해 음영 변화된 영상을 취득하고 동일한 SURF 기술자를 구하여 보조 스마트폰에서 전송된 특징점들의 기술자와 정합을 수행한다. 두 영상에서 추출한 SURF 기술자를 이용하여 정합을 수행한 사례를 그림 3 (a)에 제시하였다.

이렇게 찾아진 대응점을 이용하여 5-point 알고리즘으로 두 카메라간의 변환 행렬을 구하는 과정은 다음과 같다. 우선 무작위로 5개의 점을 선택하고 5-point 알고리즘으로 초기의 필수(essential) 행렬을 구하면 최소 1개에서 최대 10개의 필수 행렬 후보를 얻을 수 있다. 각각의 후보 행렬 E_i 에 대해 정확하지 않은 대응점을 제거하기 위하여 식 (3)의 값이 임계값 τ (본 논문에서는 5) 보다 작을 때 대응점을 inlier로 선택한다.

$$\mathbf{q}_2^T \mathbf{K}_2^{-T} \mathbf{E}_i \mathbf{K}_1^{-1} \mathbf{q}_1 < \tau \quad (3)$$

여기서 \mathbf{q}_1 과 \mathbf{q}_2 는 주 영상과 보조 영상에서의 대응점의 좌표를 나타내고 \mathbf{K}_1 과 \mathbf{K}_2 는 주 카메라와 보조 카메라의 내부 인자 행렬을 의미한다. 이때 필요한 두 카메라의 내부 인자는 Matlab 카메라 보정 툴박스^[5]를 이용해 오프라인 연산으로 추정하였다. 검출된 inlier에 해당하는

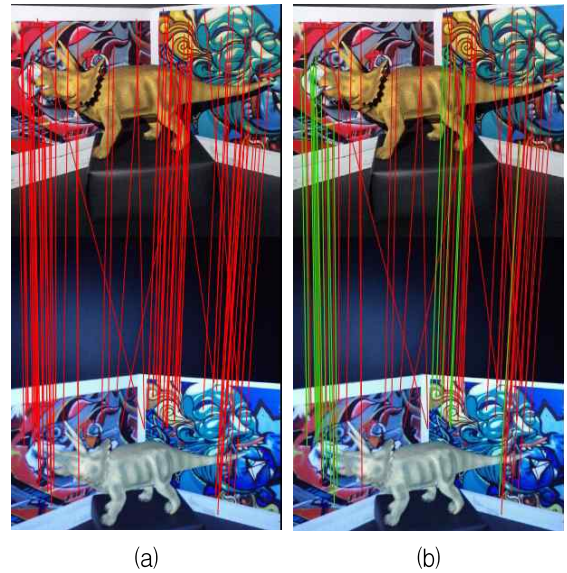


그림 3. 두 영상간의 초기 대응점 정합
(a) RANSAC 수행 전 (b) RANSAC 수행 후 (Inlier는 녹색으로 표시)

Fig. 3. Initial matching of feature points.
(a) Before performing RANSAC (b) After performing RANSAC (Inlier matching is in green).

대응점을 그림 3 (b)의 녹색 선으로 나타내었다. 이때 RANSAC의 추정 오차는 n 개의 모든 inlier에 대한 누적 오차의 합으로 식 (4)와 같이 정의한다. 따라서 선택된 5-point에 대한 최선의 행렬 E 는 누적 오차 ϵ 가 최소인 행렬로 선택한다.

$$\epsilon = \sum_{k=1}^n \mathbf{q}_{2,k}^T \mathbf{K}_2^{-T} \mathbf{E}_i \mathbf{K}_1^{-1} \mathbf{q}_{1,k} \quad (4)$$

그러나 무작위로 5개의 점을 선택하는 과정에서 outlier가 포함될 수 있으므로 상기 과정을 충분한 회수만큼 (본 논문에서는 3,000회) 반복적으로 수행하여 누적 오차가 최소인 행렬을 최종 필수 행렬 E 로 선택한다.

추정된 필수 행렬 E 는 식 (5)과 같은 회전 행렬 R 과 이동 벡터 \mathbf{t} 로 이루어져 있으며 SVD (singular value decomposition)를 통해 R 과 \mathbf{t} 를 추정할 수 있다.

$$E = RS$$

$$\text{여기서, } S = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

V. 법선 지도 및 깊이 영상 생성

전 장에 기술한 바와 같이 서로 다른 조명의 영상으로부터 카메라와 조명의 상대적 자세를 추정하면 식 (2)를 통해 각 화소에서의 법선 벡터를 추정할 수 있다. 이 과정을 모든 화소에 대해 수행하여 영상의 법선 지도를 추정한다.

깊이 영상의 생성은 추정된 법선 벡터로부터 Poisson 방정식의 풀이 과정을 거쳐 취득한다^[12]. 그 과정을 간략히 기술하면 다음과 같다. 어떤 화소 위치에서의 법선 벡터 (n_x, n_y, n_z) 는 그 위치에 해당되는 곡면에 수직이므로 영상에서 x, y 방향으로의 차분 벡터와 곡면의 법선 벡터의 내적이 0이다. 이를 수식으로 표현하면 식 (6) 및 식 (7)과 같다.

$$n_x + n_z(z(i+1, j) - z(i, j)) = 0 \tag{6}$$

$$n_y + n_z(z(i, j+1) - z(i, j)) = 0 \tag{7}$$

모든 좌표 (i, j) 에 대해 과적 (overdetermined) 연립 방정식을 생성한 후 행렬로 표현하면 식 (8)과 같이 표현된다.

$$Mz = v \tag{8}$$

여기서 M은 전경 영역에서 법선 벡터의 z방향 값으로 이루어진 희소(sparse) 행렬, V는 법선 벡터의 x 방향, y 방향의 값으로 이루어진 열벡터, Z는 구하고자 하는 깊이 값으로 구성된 열벡터를 나타낸다. 희소 행렬로 표현된 과적 연립방정식은 conjugate gradient 방법을 이용하여 해를 구할 수 있다^[13]. 본 논문에서는 이와 같은 과정으로 깊이 영상을 생성한다.

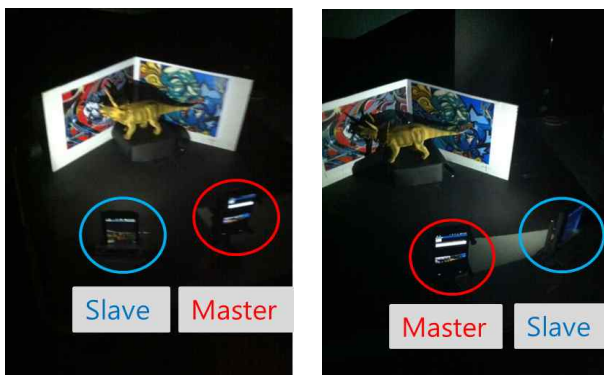


그림 4. 실험 구성 환경
Fig. 4. Experimental setup.

VI. 실험 결과

본 실험에서는 8백만 화소의 카메라와 LED 플래시, 그리고 듀얼코어 1.2GHz CPU (ARM Cortex A9)를 장착하고 있는 삼성전자의 SHW-M250S (갤럭시 SII) 스마트폰을 사용하였으며 알고리즘은 Android OS 2.3 기반에서 구현하였다. 실험 구성은 그림 4와 같이 두 대의 스마트폰으로 구성하였다. 보조 스마트폰은 위치를 변화 시키며 플래시 조명을 투사하며 주 스마트폰은 고정된 위치에서 영상을 취득하고 주요 계산과정을 수행한다. 입력 영상으로는 640×480 해상도의 10장의 영상을 취득하여 실험을 수행하였으며, 영상 취득시 주변 조명은 모두 소등하였다.

그림 5, 그림 6, 그림 7, 및 그림 8에 두 가지 실험 데이터에 대한 입력 영상 및 실험 결과를 제시하였다. 그림 5와 그림 7과 같은 10장의 영상을 사용하여 그림 6 (a)와 (b), 그림 8 (a)와 (b)와 같은 법선 지도와 깊이 영상을 복원하였다. 또한 OpenGL을 이용하여 3차원 점군(points cloud) 모델로 렌더링한 결과를 그림 6 (c)와 그림 8 (c)에 제시하였다. 실험 결과에서 보는 바와 같이 모델의 3차원 형상이 성공적으로 복원되었음을 알 수 있다.

본 논문에서 제안하는 기법으로 취득된 3차원 형상은 구조적 조명 기법 및 레이저 스캐너 등의 고정밀 3차원 형상 취득 시스템에서의 형상 취득 결과와 비교하였을 때 어느 정도 오차가 존재한다. 그 원인은 다음과 같다. 우선 스마트폰의 플래시를 이용한 조명은 물체의 크기에 비해 조명의 위치가 가깝기 때문에 photometric stereo 기법에서 가정하는 평행 입사 광선과는 차이를 보인다. 또한 플래시 조명은 모든 방향으로 균일한 밝기를 보이지 않는다. 그리고 스마트폰 카메라의 비네팅(vignetting) 효과가 완벽히 보정되지 않았다. 이와 같은 이유로 취득된 3차원 형상에는 그림 8 (c)와 같이 육안으로 관찰할 수 있는 오차가 존재하지만 본 논문에서는 스마트폰을 이용한 3차원 형상 취득의 가능성을 충분히 보였다고 할 수 있다.

그림 5 및 그림 6에 제시한 실험 과정에 대한 알고리즘 수행시간은 표 1에 제시하였다. 표 1에 나타난 바와 같이 깊이 영상 생성 과정에서 소요되는 시간이 가장 높은 비율을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이는 conjugate gradient 기법에서 300회 반복 수행하여 수렴된 해를 구한 결과이다. SURF, 영상 정합, 두 스마트폰간의 자

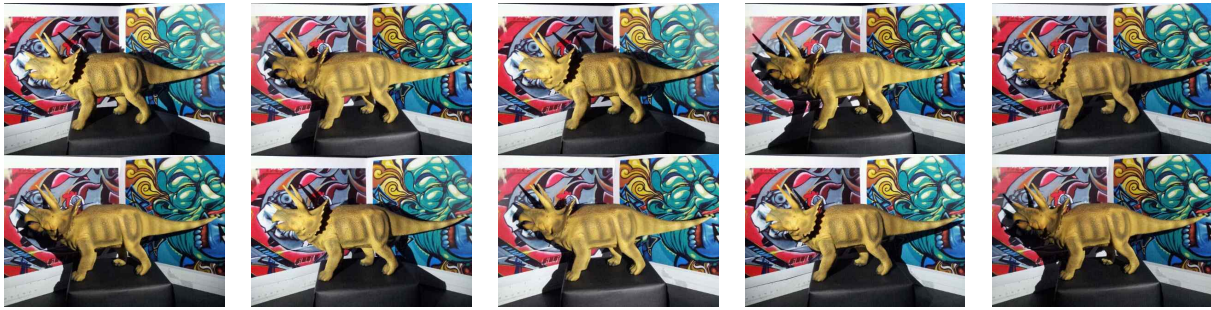
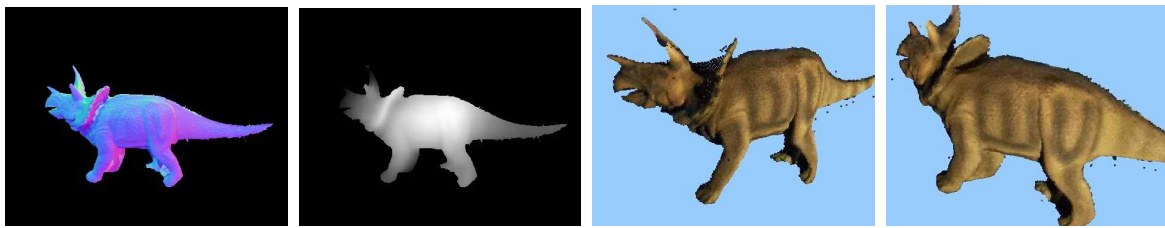


그림 5. 10장의 입력 영상
Fig. 5. Ten input images.



(a) (b) (c)

그림 6. 3차원 형상 복원 결과 (a) 법선 지도(normal map) (b) 깊이 영상 (c) 3 차원 컬러 점군 모델(color points cloud)
Fig. 6. Reconstructed 3D shape (a) Normal map (b) Depth image (c) Color points cloud.



그림 7. 10장의 입력 영상
Fig. 7. Ten input images.



(a) (b) (c)

그림 8. 3차원 형상 복원 결과
(a) 법선 지도(normal map) (b) 깊이 영상 (c) 3 차원 컬러 점군 모델(color points cloud)
Fig. 8. Reconstructed 3D shape (a) Normal map (b) Depth image (c) Color points cloud.

표 1. 알고리즘 수행 시간 (ms)
Table 1. Execution time in milliseconds.

수행 단계	수행 시간
SURF 특징점 추출	4,960
특징점 정합	1,410
카메라간의 자세 추정	14,660
전경과 배경 분리	3,350
법선 지도 생성	685
깊이 영상 생성	18,452
합 계	43,517

세추정의 경우 10장의 입력 영상 모두에 대한 수행시간을 나타낸다.

VII. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 스마트폰의 카메라와 플래시를 이용한 능동적 3차원 형상 취득 기법을 제안 하였다. 제안하는 기법은 두 대의 스마트폰이 서로 협업하는 시스템으로서 photometric stereo 기법을 이용하여 성공적으로 3차원 형상을 취득하였다. 제안하는 시스템은 전처리 과정으로 카메라 보정 및 전경에 대한 영역을 분리하고, 두 대의 카메라 간의 자세를 추정하며, 법선 지도와 깊이 영상을 복원함으로써 물체의 3차원 형상 취득을 수행한다.

본 논문에서 제안하는 스마트폰을 이용한 3차원 취득 기법은 스마트폰의 카메라와 플래시를 이용한 최초의 시스템으로 볼 수 있다. 따라서 저비용, 고품질의 소형화된 3차원 카메라로서 일반 사용자가 3차원 콘텐츠의 저작 및 응용이 가능하다. 그러나 일반적으로 조명을 이용하는 능동적 형상 취득 기법은 영상 취득 환경이 제한적이기 때문에 일반적인 야외 환경에서의 사용이 어렵다. 더욱이 제안하는 시스템에서 스마트폰의 플래시 조명은 밝지 않으므로 주변 조명을 소등해야 한다는 단점을 가지고 있다. 또한 스마트폰에서의 계산 환경은 PC에 비해 연산 속도가 여전히 느리며 상대적으로 작은 화면으로 인해 사용자의 인터페이스 조작이 불편하다는 한계점을 가지고 있다.

이와 같은 한계점에도 불구하고 본 논문에서 제안하는 시스템은 스마트폰의 3차원 형상 취득을 위한 가능성을 충분히 보였다고 할 수 있으며, 향후 HDRI (high

dynamic range imaging) 기법 또는 고조도의 플래시의 사용을 통해 좀 더 일반적인 환경에서의 형상 취득으로 연구를 확장할 수 있다. 또한 스마트폰 GPU 등의 적절한 활용 및 CPU 성능 향상을 통해 수행 속도의 향상이 가능할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] W. Lee, K. Kim, and W. Woo, "Mobile phone-based 3D modeling framework for instant interaction," *Proc. IEEE international Workshop on 3D Digital Imaging and Modeling*, pp.1755-1782, October 2009.
- [2] T. Higo, Y. Matsushita, N. Joshi, and K. Ikeuchi, "A hand-held photometric stereo camera for 3D modeling," *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision*, pp.1234-1241, September 2009.
- [3] R. J. Woodham, "Photometric method for determining surface orientation from multiple images," *Optical Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 139-144, February 1980.
- [4] C. Hernandez, G. Vogiatzis, and R. Cipolla, "Multiview photometric stereo," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 30, no. 3, pp. 548-554, March 2008.
- [5] J. Y. Bouguet, *Camera calibration toolbox for Matlab*, http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.
- [6] A. Livinov and Y. Y. Schechner, "Addressing radiometric nonidealities: A unified framework," *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 2, pp. 66-59, June 2005.
- [7] M. A. Robertson, S. Borman, and L. Stevenson, "Dynamic range improvement through multiple exposures," *Proc. IEEE International Conference on Image Processing*, vol. 3, pp. 159-163, October 1999.
- [8] H. bay, A. Ess, T. Tuytelaars, and L. V. Gool, "SURF: Speeded up robust features," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 110, no. 3, pp.346-359, June 2008.
- [9] M. fischler, R. Bollers, "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography," *Communications of the ACM*, vol. 24, pp. 381-395, June 1981.
- [10] D. Nister, "An efficient solution to the five-point relative pose problem," *IEEE Trans. on Pattern*

Analysis and Machine Intelligence, vol. 26, pp. 756-770, June 2004.

- [11] C. Rother, V. Kolmogorov, and A. Blake, "GrabCut: Interactive foreground extraction using iterated graph cuts," *ACM Trans. on Graphics*, vol. 23, pp. 309-314, August 2004.
- [12] L. C. Evans, *Partial Differential Equations*, American Mathematical Society, 1998.
- [13] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*, Third Edition, Cambridge University Press, 2007.

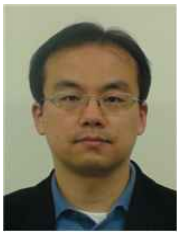
— 저 자 소 개 —



원 재 현(학생회원)
2010년 2월 인하대학교 정보통신
공학부 학사
2010년 3월~현재 인하대학교
정보통신공학과 석사과정
<주관심분야 : 컴퓨터 그래픽스
및 비전(영상기반 3차원 형상 복
원), GPGPU>



유 진 우(학생회원)
2010년 2월 인하대학교 정보통신
공학부 학사
2010년 3월~현재 인하대학교
정보통신공학과 석사과정
<주관심분야 : 컴퓨터 그래픽스
및 비전(영상기반 3차원 형상 복
원), GPGPU>



박 인 규(평생회원)-교신저자
1995년 2월 서울대학교 제어계측
공학과 학사
1997년 2월 서울대학교 제어계측
공학과 석사
2001년 8월 서울대학교 전기컴퓨
터공학부 박사

2001년 9월~2004년 3월 삼성종합기술원 (SAIT)
멀티미디어랩 전문연구원

2007년 1월~2008년 2월 미국 Mitsubishi
Electric Research Laboratories (MERL)
방문연구원

2004년 3월~현재 인하대학교 정보통신공학부
부교수

<주관심분야 : 컴퓨터 그래픽스 및 비전 (영상기
반 3차원 형상 복원, 3차원 카메라, Mobile
computational photography), GPGPU>